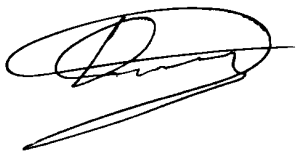
На правах рукописи



ДЖУМИК ДМИТРИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ, СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ И РЕЗИСТОРОВ, РЕАКТОРОВ ПО МАССИВАМ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ В РАБОЧИХ РЕЖИМАХ

Специальность 05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2008

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Томский политехнический университет» на кафедре «Электроэнергетические системы и высоковольтная техника» Электротехнического института.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент Гольдштейн Ефрем Иосифович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Овсянников Александр Георгиевич

кандидат технических наук, доцент Кладиев Сергей Николаевич

Ведущая организация: Филиал ОАО «НТЦ Энергетики» – СибНИИЭ, г. Новосибирск

Защита состоится «11» ноября 2008 г. в 15^{00} часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.10 при ГОУ ВПО «Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Усова, 7, ЭЛТИ, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ТПУ.

Автореферат разослан « 9 » октября 2008 г.

Ученый секретарь совета
по защите докторских
и кандидатских диссертаций
Д 212.269.10, д.т.н., профессор Кабышев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

На сегодняшний день весьма актуальной является проблема полноты и достоверности параметров электрического режима (ПЭР) и параметров схем замещения (ПСЗ) элементов электроэнергетических систем (ЭЭС) для различных задач управления и для диагностирования технического состояния электрооборудования.

На практике, как правило, измеряют следующие ПЭР: действующие значения токов и напряжений, активную и реактивную мощности. ПСЗ элементов ЭЭС в большинстве случаев определяются из справочных, проектных или паспортных данных. Известно, что значения ПСЗ линий электропередачи, силовых конденсаторов и резисторов, реакторов в процессе эксплуатации претерпевают значительные изменения и существенно зависят от множества факторов. Очевидно, что существующей информации по контролируемому объекту недостаточно для выяснения его реального технического состояния.

В энергосистемах имеются разнообразные регистраторы электрических сигналов (РЭС), используемые, как правило, лишь для регистрации аварийных процессов. Представляется, что сеть РЭС точно синхронизированных между собой во времени через каналы связи позволяет в режиме реального времени получать информацию о текущем состоянии различных элементов ЭЭС. При этом целесообразно широко использовать массивы мгновенных значений (ММЗ) напряжений и токов различных элементов ЭЭС, т.к. именно в ММЗ имеется наиболее полная и точная информация о физических процессах в ЭЭС.

Расчет режимов ЭЭС, требует знания уравнений, описывающих их элементы, структур схем замещения элементов и значений их параметров. Информацию о ПСЗ элементов ЭЭС используют для технического диагностирования состояния электрооборудования – процесса определения технического состояния объекта диагностирования с заданной точностью.

Все вышесказанное делает актуальными исследования по созданию адаптивной модели объекта, построение которой осуществляется на основе текущей информации о режимных и схемных параметрах элементов ЭЭС. Определение этих параметров в рабочем режиме позволит проводить мониторинг и диагностировать техническое состояние электрооборудования, обеспечит условия перехода к системе ремонтов по фактическому техническому состоянию электрооборудования, повысит точность и эффективность решения задач управления электрическими режимами и противоаварийного управления ЭЭС.

Цель работы

Целью диссертационной работы является разработка новых эффективных методов и алгоритмов определения параметров схем замещения линий электропередачи, силовых конденсаторов и резисторов, реакторов по массивам мгновенных значений токов и напряжений в

рабочих режимах применительно к задачам мониторинга их параметров и диагностирования технического состояния.

Для достижения указанной цели необходимо:

1. Провести анализ известных подходов к определению параметров схем замещения вышеперечисленных элементов ЭЭС, выявить недостаточно проработанные вопросы, выбрать пути их решения;
2. Исследовать процедуры определения параметров схем замещения линий электропередачи, силовых конденсаторов и резисторов, реакторов в рабочем режиме по массивам мгновенных значений токов и напряжений при минимальном числе экспериментов;
3. Довести исследования до разработки программных модулей «Расчет параметров схемы замещения линии электропередачи», «Расчет параметров схемы замещения реактора/силового резистора» и «Расчет параметров схемы замещения силового конденсатора».

Методы исследования

Для решения поставленных в работе задач используются: фундаментальные законы теоретических основ электротехники; методы обработки информации с помощью ПЭВМ; методы математического моделирования; вычислительные и физические эксперименты.

Достоверность результатов подтверждается использованием известных, проверенных методик и уравнений, результатами проведенных вычислительных и физических экспериментов, оценками точности полученных результатов.

Научная новизна работы

1. Предложены способы определения параметров схем замещения силовых конденсаторов и резисторов, реакторов в рабочем режиме по массивам мгновенных значений токов и напряжений, как по потерям мощности, так и по разностным уравнениям.
2. Разработан метод определения напряжения нейтрали и положения нулевой точки по массивам мгновенных значений фазных напряжений.
3. Предложены способы определения первичных и вторичных параметров линий электропередачи по массивам мгновенных значений токов и напряжений по потерям мощности в одном или двух рабочих режимах.

Практическая ценность работы

Разработанные способы идентификации параметров линий электропередачи, силовых конденсаторов и резисторов, реакторов в рабочем режиме позволяют проводить мониторинг их параметров и диагностировать техническое состояние.

Кроме того, результаты работы могут быть использованы при разработке эффективных методов и технических средств систем управления ЭЭС.

Реализация результатов работы

Основные результаты работы используются при разработке и совершенствовании методик контроля параметров схем замещения линий электропередачи, силовых конденсаторов и резисторов, реакторов в ходе пуско-наладочных работ, их приемки, при вводе в эксплуатацию и после окончания ремонтов в МУП «Салехардэнерго» (г. Салехард), центральной лаборатории измерительной техники ООО «ЦЛИТ-В» (г. Мыски), в Филиале ОАО «ФСК ЕЭС» – Магистральные электрические сети (МЭС) Западной Сибири (г. Сургут).

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на ряде конференций, семинаров и технических совещаний: десятой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (г. Томск, 2004 г.); Международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2005, 2006, 2007 г.г.); втором Международном семинаре «Физико-математическое моделирование систем» (г. Воронеж, 2005 г.); Международном научно-техническом семинаре «Системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии» (г. Томск, 2006 г.); научно-практическом семинаре специалистов Сибири и Дальнего Востока по диагностике электрических установок (г. Новосибирск, 2006 г.); Всероссийской конференции-конкурсе инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению программы «Энергетика и энергосбережение» (г. Томск, 2006 г.); научных семинарах кафедры «Электроэнергетические системы и высоковольтная техника» Электротехнического института Томского политехнического университета (г. Томск, 2005, 2006, 2007 г.г.); научно-техническом совете Электротехнического института Томского политехнического университета (г. Томск, 2005, 2006, 2007 г.г.); технических совещаниях – МУП «Салехардэнерго» (г. Салехард, 2007 г.), центральной лаборатории измерительной техники ООО «ЦЛИТ-В» (г. Мыски, 2007 г.), в Филиале ОАО «ФСК ЕЭС» – Магистральные электрические сети (МЭС) Западной Сибири (г. Сургут, 2007 г.).

Публикации

По результатам проведенных исследований опубликовано 27 печатных работ, включая 16 патентов РФ на изобретения и полезные модели, учебное пособие и 2 статьи в рецензируемом периодическом издании.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 172 наименований, 5 приложений. Общий объем диссертации 180 страниц, в т.ч.: 70 рисунков и 79 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и дана общая характеристика выполненной работы. Сформулированы цель работы, научная новизна и практические результаты.

В первой главе приведены общие сведения о линиях электропередачи, силовых конденсаторах и резисторах, реакторах, проведен анализ их полных и упрощенных схем замещения. В работах Идельчика В.И., Гамма А.З., Мельникова Н.А., Гусейнова Ф.Г., Блок В.М., Бердина А.С., Шелюга С.Н., Суворова А.А. и др. приведены схемы замещения элементов ЭЭС и величины ошибок задания их параметров.

Обсуждаются трудности определения всех параметров вышеперечисленных элементов ЭЭС и невозможность в принципе определения параметров в рабочем режиме (без вывода из эксплуатации). Рассмотрены принципиальные возможности определения ПЭР и ПСЗ по ММЗ токов и напряжений и показывается перспективность разработки «удобного» математического аппарата (названного «дискретизированной электротехникой» (ДЭ)), для систематического использования дискретизированных экспериментальных данных.

Даны общие сведения о регистраторах электрических сигналов. Обращено внимание на первый российский регистратор параметров переходных режимов SMART-WAMS – основной инструмент системы мониторинга переходных режимов единой энергетической системы. Уже сегодня, еще до повсеместного внедрения такого регистратора, стоит задача получения «согласованных» (синхронизированных) измерений при использовании систем точной синхронизации на основе GPS и ГЛОНАСС.

К сожалению, до последнего времени не уделялось должное внимание «технологии» обработки массивов мгновенных значений токов и напряжений.

- В этом плане интересны исследования ТПУ (Гольдштейн Е.И. и Бацева Н.Л.), развивающие геометрическую трактовку реактивной мощности сдвига (профессор Маевский О.А.) для сигналов $a(t_j)$ и $b(t_j)$:

$$Q_{ab} = \frac{1}{4\pi}\sum_{j=1}^{N}\left[a(t_j) - a(t_{j+1})\right]\cdot\left[b(t_j) + b(t_{j+1})\right]_{j=1}^{N}. \qquad (1)$$

- При определении сдвига фаз между любыми двумя сигналами (не обязательно синусоидальными!) обращено внимание на теорему Б.Д.Х. Телледжена (Теллегена) для квазимощности:

$$\sum_p i'_p \cdot u''_p = \sum_a i''_a \cdot u'_a . \qquad (2)$$

Здесь токи i'_p, i''_a и напряжения u''_p и u'_a могут рассматриваться как виртуальные. Один и два штриха относятся к двум разным состояниям цепи (при одной и той же топологии!). Хотя произведения вида $i'_p \cdot u''_p$ имеют размерность мощности, но реальной мощностью не являются и

названы квазимощностью. В ТПУ предложено находить активную $\overset{*}{P}_{ab}$ и реактивную $\overset{*}{Q}_{ab}$ квазимощности, обусловленные сигналами $a(t)$ и $b(t)$ с действующими значениями A и B, по формулам:

$$\overset{*}{P}_{ab} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} a(t_j)\cdot b(t_j)\Big|_{j=1}^{N}; \quad \overset{*}{Q}_{ab} = \frac{1}{4\pi}\sum_{j=1}^{N}\left[a(t_j) - a(t_{j+1})\right]\cdot\left[b(t_j) + b(t_{j+1})\right]_{j=1}^{N}. \quad (3)$$

Угол сдвига фаз между сигналами $a(t)$ и $b(t)$ можно определить по любой из трех формул:

$$\cos\varphi_{ab} = \overset{*}{P}_{ab}\Big/\left(A\cdot B\right); \ (4) \quad \sin\varphi_{ab} = \overset{*}{Q}_{ab}\Big/\left(A\cdot B\right); \ (5) \quad tg\varphi_{ab} = \overset{*}{Q}_{ab}\Big/\overset{*}{P}_{ab}. \ (6)$$

К сожалению, аппарат ДЭ в известных работах не обобщен и не систематизирован.

Все вышеизложенное позволяет сформулировать основные задачи, решаемые в диссертационной работе:

1. Разработать «удобный» математический аппарат дискретизированной электротехники и оценить погрешность его основных процедур. Предложить процедуры изменения шага дискретизации в массивах мгновенных значений токов и напряжений.
2. Разработать методики определения параметров силовых конденсаторов и резисторов, реакторов. Предложить методику определения напряжения нейтрали и положения нулевой точки.
3. Разработать методики определения первичных и вторичных параметров линий электропередачи.
4. Исследовать влияние шага дискретизации и погрешности измерительного тракта на точность определения параметров элементов ЭЭС.

Во второй главе рассмотрены процедуры ДЭ и их использование для определения ПЭР.

- В общем случае имеем два массива экспериментальных данных $a(t_j)$ и $b(t_j)$, полученных в одни и те же моменты времени $t_1, t_2, \ldots t_j, \ldots t_N$, где $t_2 = t_1 + \Delta t$; … $t_j = t_{j-1} + \Delta t$; … $t_N = t_{N-1} + \Delta t$ с шагом дискретизации Δt при общем числе отсчетов массива N и длине массива T_M (предполагаем, что длина массива равна или больше периода сигнала T), т. е. $T_M \geq T$, $N = T/\Delta t$.

Основные правила дискретизированной электротехники:

$$\left.\begin{aligned}
&a(t_j)\Big|_{j=1}^{N} = a(t_1), a(t_2), \ldots a(t_j), \ldots a(t_N); \quad b(t_j)\Big|_{j=1}^{N} = b(t_1), b(t_2), \ldots b(t_j), \ldots b(t_N);\\
&\left[a(t_j)\cdot b(t_j)\right]_{j=1}^{N} = a(t_1)\cdot b(t_1), a(t_2)\cdot b(t_2), \ldots a(t_j)\cdot b(t_j), \ldots a(t_N)\cdot b(t_N);\\
&a^2(t_j)\Big|_{j=1}^{N} = a(t_1)\cdot a(t_1), a(t_2)\cdot a(t_2), \ldots a(t_j)\cdot a(t_j), \ldots a(t_N)\cdot a(t_N);\\
&\left[a(t_j) + b(t_j)\right]_{j=1}^{N} = a(t_1) + b(t_1), a(t_2) + b(t_2), \ldots a(t_j) + b(t_j), \ldots a(t_N) + b(t_N).
\end{aligned}\right\} \quad (7)$$

В табл. 1 приведены базовые формулы классической электротехники и аналогичные им формулы ДЭ (8)-(17).

Таблица 1 – Базовые формулы классической и дискретизированной электротехники

Наименование	Классическая электротехника	Дискретизированная электротехника
Действующее, эффективное значение сигнала	$A=\left[\frac{1}{T}\int_0^T a^2(t)dt\right]^{0,5}$	$A=\left[\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}a^2(t_j)\Big\|_{j=1}^{N}\right]^{0,5}$ (8)
Среднее значение сигнала	$A_{\text{ср}}=\frac{1}{T}\int_0^T\|a(t)\|dt$	$A_{\text{ср}}=\frac{1}{N_M}\sum_{j=1}^{N}\|a(t_j)\|\Big\|_{j=1}^{N}$
Постоянная составляющая сигнала	$A_0=\frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2}a(t)dt$	$A_0=A_{\text{ср}}$, при $T_M=T$; $N_M=N=\frac{T}{\Delta t}$
Мгновенная мощность сигналов $a(t_j)$ и $b(t_j)$	$p_{ab}=a(t)\cdot b(t)$	$p_{ab}(t_j)\Big\|_{j=1}^{N}=a(t_j)\cdot b(t_j)\Big\|_{j=1}^{N}$ (9)
Активная мощность сигналов $a(t_j)$ и $b(t_j)$ при угле сдвига фаз φ_{ab}	$P_{ab}=A\cdot B\cdot\cos\varphi_{ab}$	$P_{ab}=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}p_{ab}(t_j)\Big\|_{j=1}^{N}$ (10)
Полная мощность сигналов $a(t_j)$ и $b(t_j)$	$S_{ab}=A\cdot B$	$S_{ab}=U_a\cdot I_b=$ $=\left[\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}a^2(t_j)\Big\|_{j=1}^{N}\right]^{0,5}\cdot$ $\cdot\left[\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}b^2(t_j)\Big\|_{j=1}^{N}\right]^{0,5}$ (11)
Реактивная мощность одночастотных сигналов $a(t_j)$ и $b(t_j)$ при угле сдвига фаз φ_{ab}	$Q_{ab}=A\cdot B\cdot\sin\varphi_{ab}$	$Q_{ab}=\frac{1}{4\pi}\sum_{j=1}^{N}\left[a(t_j)-a(t_{j+1})\right]\cdot$ $\cdot\left[b(t_j)+b(t_{j+1})\right]\Big\|_{j=1}^{N}$ (12)
Реактивная мощность многочастотных сигналов $a(t_j)$ и $b(t_j)$	$Q_{ab}=\sum_{k=1}^{\infty}kA_kB_k\sin\varphi_k$	
Первый закон Кирхгофа для токов в узле электрической цепи с q	$\sum_{k=1}^{q}i_k(t)=0$	$\sum_{k=1}^{q}i_k(t_j)\Big\|_{j=1}^{N}=0$ (13)

ветвями		
Второй закон Кирхгофа для напряжений в контуре с *l* ветвями	$\sum_{k=1}^{l} u_k(t) = 0$	$\sum_{k=1}^{l} u_k(t_j)\Big\|_{j=1}^{N} = 0$ (14)
Закон Ома для *k*-го участка цепи	$Z_k = U_k / I_k$	$R_k = P_k / I_k^2 ; \quad X_k = Q_k / I_k^2$ (15)
Производные сигнала	–	$a^{\bullet}(t_j) = \frac{1}{2\Delta t}\left[a(t_{j+1}) - a(t_{j-1})\right]_{j=1}^{N}$; (16) $a^{\bullet}(t_j) = \frac{1}{12\Delta t}\left[\left(a(t_{j-2}) - a(t_{j+2})\right) - 8\cdot\left(a(t_{j-1}) - a(t_{j+1})\right)\right]_{j=1}^{N}$ (17)

Исследование влияния шага дискретизации на точность основных процедур ДЭ показало, что увеличение числа разбиений N приводит к уменьшению погрешности описания непрерывной функции дискретизированной. Наименьшее значение погрешности определения производной функции можно получить в случае использования пятиточечной формулы дифференцирования (17).

Большинство используемых в электроэнергетических системах регистраторов обеспечивают получение порядка $N = 10\text{-}32$, тогда как некоторые задачи требуют 64, 128, 240, 400 точек на периоде. Иногда измерения в начале и в конце ЛЭП проводятся с различным Δt, что осложняет определение ПЭР и ПСЗ линии электропередачи. Рассмотрены два метода интерполяции – линейная и сплайнами. Показано, что наименьшее значение относительной погрешности можно получить при $N \geq 32$ и при использовании интерполяции сплайнами.

Процедуры интерполяции были использованы при исследовании ЛЭП 220 кВ «Холмогорская–Вынгапур» и «Луговая-1–Новая-1» (МЭС ЗС, г. Сургут), ЛЭП 110 кВ «Восточная–Малиновка» (МЭС, г. Томск), связывающих подстанции, оснащенные регистраторами с разными *N*. Была подтверждена работоспособность разработанных программ в среде MATLAB, возможность и целесообразность увеличения N программным путем, без перехода к РЭС с более сложными и дорогостоящими АЦП.

Результаты синхронных измерений ММЗ токов и напряжений диссертанту недоступны. Поэтому в настоящей работе исходные данные для исследований получены: 1) с помощью несинхронизированных между собой РЭС, регистрирующих аварийные процессы при повреждениях в ЭЭС; 2) на основе математических моделей исследуемых схем замещения линий электропередачи.

Определение вторичных параметров линии электропередачи по исходным данным предлагается проводить в ходе расчета коэффициента распространения электромагнитной волны γ_0:

- Определяют действующие значения напряжений и токов в начале U_1, I_1 и в конце U_2, I_2 линии электропередачи:

$$U_1 = \left[\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} u_1^2(t_j)\Big|_{j=1}^{N}\right]^{0,5}, \qquad I_1 = \left[\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} i_1^2(t_j)\Big|_{j=1}^{N}\right]^{0,5}; \tag{18}$$

$$U_2 = \left[\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} u_2^2(t_j)\Big|_{j=1}^{N}\right]^{0,5}, \qquad I_2 = \left[\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} i_2^2(t_j)\Big|_{j=1}^{N}\right]^{0,5}. \tag{19}$$

- Находят активные $\overset{*}{P}_I$, $\overset{*}{P}_U$ и реактивные $\overset{*}{Q}_I$, $\overset{*}{Q}_U$ квазимощности по току и напряжению по формулам (3).
- Определяют коэффициент затухания напряжения и коэффициент затухания тока, коэффициент сдвига фазы тока и коэффициент сдвига фазы напряжения:

$$\alpha_U = \ln U_1/U_2 = [\text{Нп}]; \tag{20}$$

$$\alpha_I = \ln I_1/I_2 = [\text{Нп}]; \tag{21}$$

$$\beta_I = arctg\,\overset{*}{Q}_I \Big/ \overset{*}{P}_I; \tag{22}$$

$$\beta_U = arctg\,\overset{*}{Q}_U \Big/ \overset{*}{P}_U. \tag{23}$$

- Находят вторичные параметры линии электропередачи (на единицу длины линии):

$$\alpha_{U(0)} = \alpha_U/L, \quad \alpha_{I(0)} = \alpha_I/L, \quad \beta_{U(0)} = \beta_U/L, \quad \beta_{I(0)} = \beta_I/L. \tag{24}$$

Показано, что вторичные параметры ЛЭП, полученные с помощью предлагаемого способа, близки к вторичным параметрам, полученным непосредственно по осциллограммам токов и напряжений.

Дана оценка влияния инструментальной погрешности трансформаторов напряжения, трансформаторов тока, регистраторов электрических сигналов и канала синхронизации на точность определения ПЭР и ПСЗ.

Третья глава посвящена идентификации параметров схем замещения линий электропередачи.

Общие процедуры при определении параметров прямой и обратной Г-, Т- и П-образной схем замещения ЛЭП:

1) Определяют падение напряжения в продольной ветви СЗ и ток в поперечной ветви по первому и второму законам Кирхгофа:

$$\Delta u_{12}(t_j)\Big|_{j=1}^{N} = u_1(t_j)\Big|_{j=1}^{N} - u_2(t_j)\Big|_{j=1}^{N}; \tag{25}$$

$$i_0(t_j)\Big|_{j=1}^{N} = i_1(t_j)\Big|_{j=1}^{N} - i_2(t_j)\Big|_{j=1}^{N}. \tag{26}$$

2) Используют процедуры определения активных и реактивных мощностей в начале и в конце ЛЭП:

$$P_1 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left[u_1(t_j)\cdot i_1(t_j)\right]_{j=1}^{N}; \; Q_1 = \frac{1}{4\pi}\sum_{j=1}^{N}\left[u_1(t_j) - u_1(t_{j+1})\right]\cdot\left[i_1(t_j) + i_1(t_{j+1})\right]_{j=1}^{N}; \tag{27}$$

$$P_2 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left[u_2(t_j)\cdot i_2(t_j)\right]_{j=1}^{N}; \; Q_2 = \frac{1}{4\pi}\sum_{j=1}^{N}\left[u_2(t_j) - u_2(t_{j+1})\right]\cdot\left[i_2(t_j) + i_2(t_{j+1})\right]_{j=1}^{N}. \tag{28}$$

3) По ММЗ токов определяют их действующие значения в конкретных ветвях СЗ линий:

$$I_1 = \left[\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} i_1^2(t_j)\Big|_{j=1}^{N}\right]^{0,5}; \quad I_2 = \left[\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} i_2^2(t_j)\Big|_{j=1}^{N}\right]^{0,5}; \quad I_0 = \left[\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} i_0^2(t_j)\Big|_{j=1}^{N}\right]^{0,5}. \tag{29}$$

4) Параметры СЗ находят очевидным образом:

$$R_k = \Delta P_k / I_k^2 ; \qquad X_k = \Delta Q_k / I_k^2 . \tag{30}$$

Для прямой и обратной Г-образной схем замещения (см. рис. 1) четыре искомых параметра линии соответствуют четырем уравнениям: 1) составленному по 1-му закону Кирхгофа; 2) составленному по 2-му закону Кирхгофа; 3) и 4) – по уравнениям для активной и реактивной мощностей.

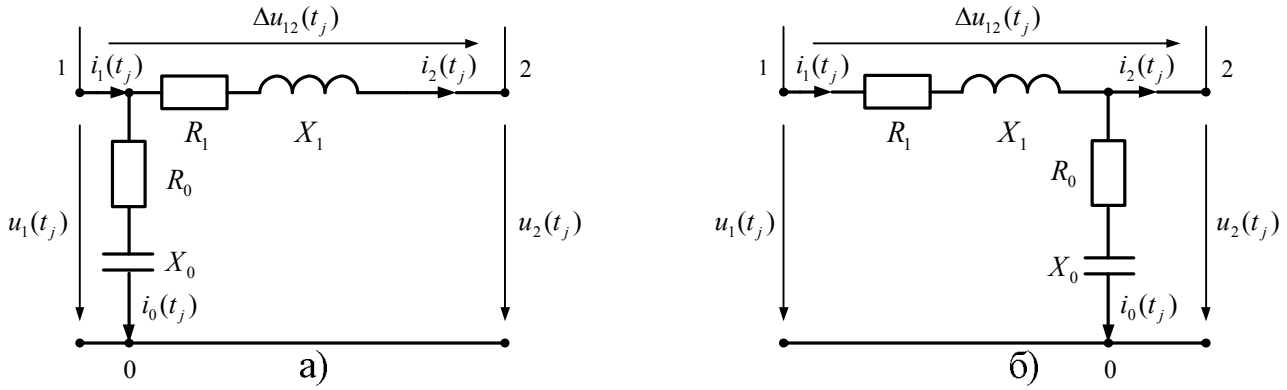


Рис. 1. Прямая (а) и обратная (б) Г-образные схемы замещения ЛЭП

Для прямой Г-образной СЗ имеем:

- Определяют падение напряжения $\Delta u_{12}(t_j)$ на продольном сопротивлении схемы замещения и ток $i_0(t_j)$ в поперечной ветви по формулам (25) и (26).
- Рассчитывают активные ΔP_{12}, ΔP_0 и реактивные ΔQ_{12}, ΔQ_0 потери мощности в продольной и поперечной ветвях:

$$\Delta P_{12} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left[\Delta u_{12}(t_j)\cdot i_2(t_j)\right]_{j=1}^{N}; \qquad \Delta P_0 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left[u_1(t_j)\cdot i_0(t_j)\right]_{j=1}^{N}; \tag{31}$$

$$\Delta Q_{12} = \frac{1}{4\pi}\sum_{j=1}^{N}\left[\Delta u_{12}(t_j) - \Delta u_{12}(t_{j+1})\right]\cdot\left[i_2(t_j) + i_2(t_{j+1})\right]_{j=1}^{N}; \tag{32}$$

$$\Delta Q_0 = \frac{1}{4\pi}\sum_{j=1}^{N}\left[u_1(t_j) - u_1(t_{j+1})\right]\cdot\left[i_0(t_j) + i_0(t_{j+1})\right]_{j=1}^{N}. \tag{33}$$

- Находят действующие значения токов I_2 и I_0 по формулам (29).
- По формулам (30) определяют параметры ветвей СЗ.

Для обратной Г-образной СЗ имеем:

«Новыми» будут процедуры определения активных ΔP_{12}, ΔP_0 и реактивных ΔQ_{12}, ΔQ_0 потерь мощностей в продольной и поперечной ветвях:

$$\Delta P_{12} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left[\Delta u_{12}(t_j)\cdot i_1(t_j)\right]_{j=1}^{N}; \qquad \Delta P_0 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left[u_2(t_j)\cdot i_0(t_j)\right]_{j=1}^{N}; \tag{34}$$

$$\Delta Q_{12} = \frac{1}{4\pi}\sum_{j=1}^{N}\left[\Delta u_{12}(t_j) - \Delta u_{12}(t_{j+1})\right]\cdot\left[i_1(t_j) + i_1(t_{j+1})\right]_{j=1}^{N}; \tag{35}$$

$$\Delta Q_0 = \frac{1}{4\pi}\sum_{j=1}^{N}\left[u_2(t_j) - u_2(t_{j+1})\right]\cdot\left[i_0(t_j) + i_0(t_{j+1})\right]_{j=1}^{N}. \tag{36}$$

Для определения параметров Т-образной СЗ линии электропередачи (рис. 2, а) принимают:

$$\Delta u_{12}^{'}(t_j) = k \cdot u_{12}(t_j); \qquad \Delta u_{12}^{''}(t_j) = (1-k) \cdot u_{12}(t_j). \tag{37}$$

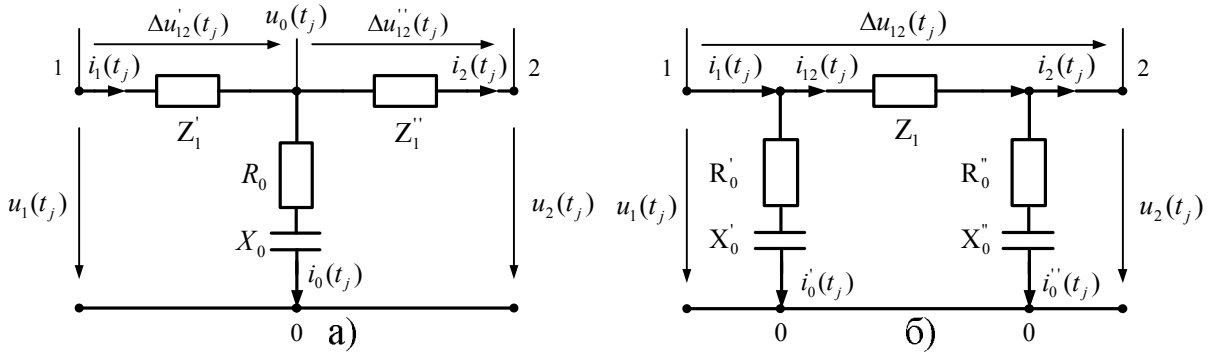


Рис. 2. Т- и П-образная схемы замещения линии электропередачи

Теперь при каждом k в диапазоне его изменения от 0 до 1,0 можно будет сразу найти $\Delta u_{12}^{'}(t_j)$ и $\Delta u_{12}^{''}(t_j)$. Т.к. токи $i_1(t_j)$ и $i_2(t_j)$ известны, то появляется возможность найти при каждом k соответствующие активные $\Delta P_{12}^{'}$, $\Delta P_{12}^{''}$ и реактивные $\Delta Q_{12}^{'}$, $\Delta Q_{12}^{''}$ потери мощности в продольных ветвях:

$$\Delta P_{12}^{'} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left[\Delta u_{12}^{'}(t_j) \cdot i_1(t_j)\right]_{j=1}^{N}; \qquad \Delta P_{12}^{''} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left[\Delta u_{12}^{''}(t_j) \cdot i_2(t_j)\right]_{j=1}^{N}; \tag{38}$$

$$\Delta Q_{12}^{'} = \frac{1}{4\pi}\sum_{j=1}^{N}\left[\Delta u_{12}^{'}(t_j) - \Delta u_{12}^{'}(t_{j+1})\right] \cdot \left[i_1(t_j) + i_1(t_{j+1})\right]_{j=1}^{N}; \tag{39}$$

$$\Delta Q_{12}^{''} = \frac{1}{4\pi}\sum_{j=1}^{N}\left[\Delta u_{12}^{''}(t_j) - \Delta u_{12}^{''}(t_{j+1})\right] \cdot \left[i_2(t_j) + i_2(t_{j+1})\right]_{j=1}^{N}. \tag{40}$$

Действующие значения токов I_1 и I_2 в продольных ветвях находят по формулам (29). По мощностям и действующим значениям токов находят параметры продольных ветвей СЗ:

$$R_1^{'} = \Delta P_{12}^{'} / I_1^2; \qquad X_1^{'} = \Delta Q_{12}^{'} / I_1^2; \qquad R_1^{''} = \Delta P_{12}^{''} / I_2^2; \qquad X_1^{''} = \Delta Q_{12}^{''} / I_2^2; \tag{41}$$

При определении параметров поперечной ветви учитывают процедуры (26), (29) и (30). Тогда для поперечной ветви новыми будут следующие процедуры:

$$u_0(t_j)\Big|_{j=1}^{N} = u_1(t_j)\Big|_{j=1}^{N} - \Delta u_{12}^{'}(t_j)\Big|_{j=1}^{N}; \tag{42}$$

$$\Delta P_0 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left[u_0(t_j) \cdot i_0(t_j)\right]_{j=1}^{N}; \tag{43}$$

$$\Delta Q_0 = \frac{1}{4\pi}\sum_{j=1}^{N}\left[u_0(t_j) - u_0(t_{j+1})\right] \cdot \left[i_0(t_j) + i_0(t_{j+1})\right]_{j=1}^{N}. \tag{44}$$

Ясно, что проведенный описанным выше образом анализ дает лишь область существования возможных решений при неизвестном до сих пор значении «*k*» в выражениях (37).

Для определения конкретного значения *k* может быть использована дополнительная информация:

- из опыта холостого хода (ХХ). Тогда по полученным значениям сопротивлений продольных и поперечной ветвей для режима нагрузки (НР) и для режима ХХ определяют значение сопротивлений

продольных и поперечной ветвей Т-образной СЗ линии: или $\left(Z_1^{'}\right)_{HP}=\left(Z_1^{'}\right)_{XX}$ или $\left(Z_0\right)_{HP}=\left(Z_0\right)_{XX}$;

- из требования равенства полных сопротивлений одной и другой продольных ветвей $Z_1^{'}=Z_1^{''}$, где $Z_1^{'}=\sqrt{R_1^{'2}+X_1^{'2}}$ и $Z_1^{''}=\sqrt{R_1^{''2}+X_1^{''2}}$.

Для определения параметров П-образной СЗ линии (рис. 2, б) принимаем:

$$i_0^{'}(t_j)=k\cdot i_0(t_j);\qquad i_0^{''}(t_j)=\left(1-k\right)\cdot i_0(t_j). \tag{45}$$

Теперь при каждом k в диапазоне его изменения от 0 до 1,0 можно будет сразу найти $i_0^{'}(t_j)$ и $i_0^{''}(t_j)$, а затем найти соответствующие активные $\Delta P_0^{'}$, $\Delta P_0^{''}$ и реактивные $\Delta Q_0^{'}$, $\Delta Q_0^{''}$ потери мощности в поперечных ветвях:

$$\Delta P_0^{'}=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left[u_1(t_j)\cdot i_0^{'}(t_j)\right]_{j=1}^{N};\qquad \Delta P_0^{''}=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left[u_2(t_j)\cdot i_0^{''}(t_j)\right]_{j=1}^{N}; \tag{46}$$

$$\Delta Q_0^{'}=\frac{1}{4\pi}\sum_{j=1}^{N}\left[u_1(t_j)-u_1(t_{j+1})\right]\cdot\left[i_0^{'}(t_j)+i_0^{'}(t_{j+1})\right]_{j=1}^{N}; \tag{47}$$

$$\Delta Q_0^{''}=\frac{1}{4\pi}\sum_{j=1}^{N}\left[u_2(t_j)-u_2(t_{j+1})\right]\cdot\left[i_0^{''}(t_j)+i_0^{''}(t_{j+1})\right]_{j=1}^{N}. \tag{48}$$

По мощностям и действующим значениям токов находят параметры поперечных ветвей СЗ:

$$R_0^{'}=\Delta P_0^{'}/I_0^{'2};\quad X_0^{'}=\Delta Q_0^{'}/I_0^{'2};\quad R_0^{''}=\Delta P_0^{''}/I_0^{''2};\quad X_0^{''}=\Delta Q_0^{''}/I_0^{''2}. \tag{49}$$

При определении параметров продольной ветви учитывают процедуры (29) и (30) и «новые» процедуры:

$$i_{12}(t_j)\Big|_{j=1}^{N}=i_1(t_j)\Big|_{j=1}^{N}-i_0^{'}(t_j)\Big|_{j=1}^{N}; \tag{50}$$

$$\Delta P_{12}=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left[\Delta u_{12}(t_j)\cdot i_{12}(t_j)\right]_{j=1}^{N}; \tag{51}$$

$$\Delta Q_{12}=\frac{1}{4\pi}\sum_{j=1}^{N}\left[\Delta u_{12}(t_j)-\Delta u_{12}(t_{j+1})\right]\cdot\left[i_{12}(t_j)+i_{12}(t_{j+1})\right]_{j=1}^{N}. \tag{52}$$

Проведенный описанным выше образом анализ дает лишь область существования возможных решений при неизвестном до сих пор значении «*k*» в выражениях (45).

Для определения конкретного значения k может быть использована дополнительная информация, полученная на основе опыта ХХ или исходя из требования равенства полных сопротивлений одной и другой поперечных ветвей $Z_0^{'}=Z_0^{''}$, где $Z_0^{'}=\sqrt{R_0^{'2}+X_0^{'2}}$ и $Z_0^{''}=\sqrt{R_0^{''2}+X_0^{''2}}$.

Методическую погрешность определения ПСЗ ЛЭП $\delta^{'}$ находят как разность между искомым параметром A и его точным значением A_T (паспортной или справочной величиной) по отношению к точному значению:

$$\delta^{'}=\left|\left(A-A_T\right)/A_T\right|\cdot 100\%.$$

Методическая погрешность $\delta^{'}$ определения искомых параметров прямой и обратной Г-образной, симметричной Т- и П-образной схем

замещения математических моделей ЛЭП 10-220 кВ при $N = 32$ не превышает значений приведенных в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Прямая Г-образная СЗ ЛЭП				Обратная Г-образная СЗ ЛЭП			
δ_{R_1}, %	δ_{X_1}, %	δ_{R_0}, %	δ_{X_0}, %	δ_{R_1}, %	δ_{X_1}, %	δ_{R_0}, %	δ_{X_0}, %
0,0521	0,6437	0,0338	0,6425	0,0165	0,6488	0,0863	0,6425

Таблица 3

Т-образная СЗ ЛЭП				П-образная СЗ ЛЭП			
$\delta_{R_1^{'}}$, %	$\delta_{X_1^{'}}$, %	δ_{R_0}, %	δ_{X_0}, %	δ_{R_1}, %	δ_{X_1}, %	$\delta_{R_0^{'}}$, %	$\delta_{X_0^{'}}$, %
1,2667	2,7129	5,3892	0,7695	0,0701	0,6437	0,2366	0,6427

Из табл. 2 и 3 по значению методической погрешности $\delta^{'}$ видно, что параметры СЗ ЛЭП, полученные с помощью предлагаемых способов, близки к их справочным значениям.

Суммарная погрешность δ_{Σ} определения ПСЗ ЛЭП определяется суммарными методической $\delta_{мет\Sigma}$ и инструментальной $\delta_{инстр\Sigma}$ погрешностями:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta^2_{мет\Sigma} + \delta^2_{инстр\Sigma}} .$$

Суммарная методическая погрешность определяется погрешностью используемых процедур при определении ПСЗ ЛЭП, погрешность которых в основном определяется числом отсчетов N на периоде.

Суммарная инструментальная погрешность зависит от погрешности трансформаторов тока и напряжения, регистраторов электрических сигналов и канала синхронизации.

Наименьшую суммарную погрешность δ_{Σ} определения параметров схем замещения линий электропередачи можно получить лишь при $N \geq 64$, используя трансформаторы тока и напряжения класса точности «0,5», канал синхронизации ГЛОНАСС и регистратор электрических сигналов SMART-WAMS.

Четвертая глава посвящена идентификации параметров схем замещения силовых конденсаторов и резисторов, реакторов с учетом того факта, что они не являются идеальными элементами ЭЭС: реактор имеет вполне определенное активное сопротивление; резистор обладает всегда некоторой индуктивностью; конденсатор имеет вполне реальные потери активной мощности.

Учтем и то, что схема замещения и реактора и силового резистора будет одной и той же. Отличие будет лишь в том, что для реактора $R << X_P$, для резистора $R >> X_P$. Поэтому далее определение их параметров рассматривается с общих позиций (см. рис. 3, а).

К сожалению, точка $2^{'}$ на рис. 3, а нам недоступна, поэтому невозможно измерить «напрямую» падение напряжения на активном сопротивлении U_R и индуктивности U_L РР. Аналогично нет возможности

измерить токи I_R и I_C, протекающие через активное сопротивление и емкость конденсатора (см. рис. 3, б). Практически нельзя и воспользоваться законом Ома для каждой из схем замещения элементов ЭЭС.

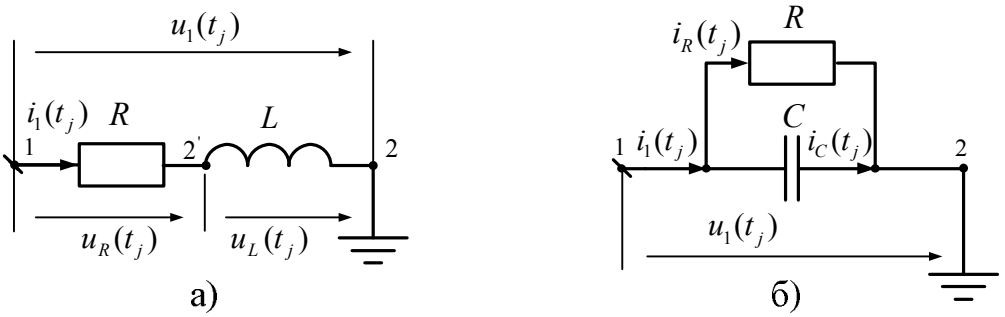


Рис. 3. Схема замещения реального реактора/резистора (РР) (а) и реального конденсатора (б)

Решение на основе мощностных характеристик:

1) Определяют падение напряжения в ветви схемы замещения по второму закону Кирхгофа:

$$\Delta u_{12}(t_j)\Big|_{j=1}^{N} = u_1(t_j)\Big|_{j=1}^{N} - u_2(t_j)\Big|_{j=1}^{N}; \qquad (53)$$

2) Находят потери активной и реактивной мощностей на сопротивлениях СЗ:

$$\Delta P_1 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left[\Delta u_{12}(t_j)\cdot i_1(t_j)\right]_{j=1}^{N}; \qquad (54)$$

$$\Delta Q_1 = \frac{1}{4\pi}\sum_{j=1}^{N}\left[\Delta u_{12}(t_j) - \Delta u_{12}(t_{j+1})\right]\cdot\left[i_1(t_j) + i_1(t_{j+1})\right]_{j=1}^{N}; \qquad (55)$$

3) Определяют действующее значение тока в ветви СЗ и рассчитывают ПСЗ:

$$I_1 = \left[\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} i_1^2(t_j)\Big|_{j=1}^{N}\right]^{0,5}; \quad (56) \qquad R_k = \Delta P_k / I_k^2; \qquad X_k = \Delta Q_k / I_k^2. \quad (57)$$

Решение на основе разностных уравнений:

1) Определяют падение напряжения в ветви СЗ по формуле (53);
2) Находят для моментов времени t_j и t_{j+1} производные тока $i_1^{'}(t_j)$, $i_1^{'}(t_{j+1})$ и напряжения $\Delta U_{12}^{'}(t_j)$, $\Delta U_{12}^{'}(t_{j+1})$ по формуле (17).

Исследования по определению ПСЗ проводились на дугогасящем реакторе РДМР-485/10 (г. Томск, ЦЭС ОАО «ТРК», подстанция «Октябрьская» 110/35/10 кВ), заземляющем резисторе РЗ-8000-35 (ВЭС «Иркутскэнерго», подстанция «Хужир» 35/10 кВ), батарее статических конденсаторов БСК-2 (г. Томск, МЭС ОАО «ФСК ЕЭС», подстанция «Восточная» 220/110/35/10 кВ) и на математических моделях.

При решении задачи идентификации параметров схем замещения дугогасящих реакторов (заземляющих реакторов ЗР) и резисторов Р (рис. 4, а и рис. 4, б), вследствие недоступности измерения напряжения нейтрали,

был использован способ определения напряжения нейтрали и положения нулевой точки по экспериментальным данным (ММЗ фазных напряжений).

Предположение о симметричности системы линейных (междуфазных) напряжений дает возможность нахождения величины и положения вектора $\dot{U}_A$ (рис. 4, в).

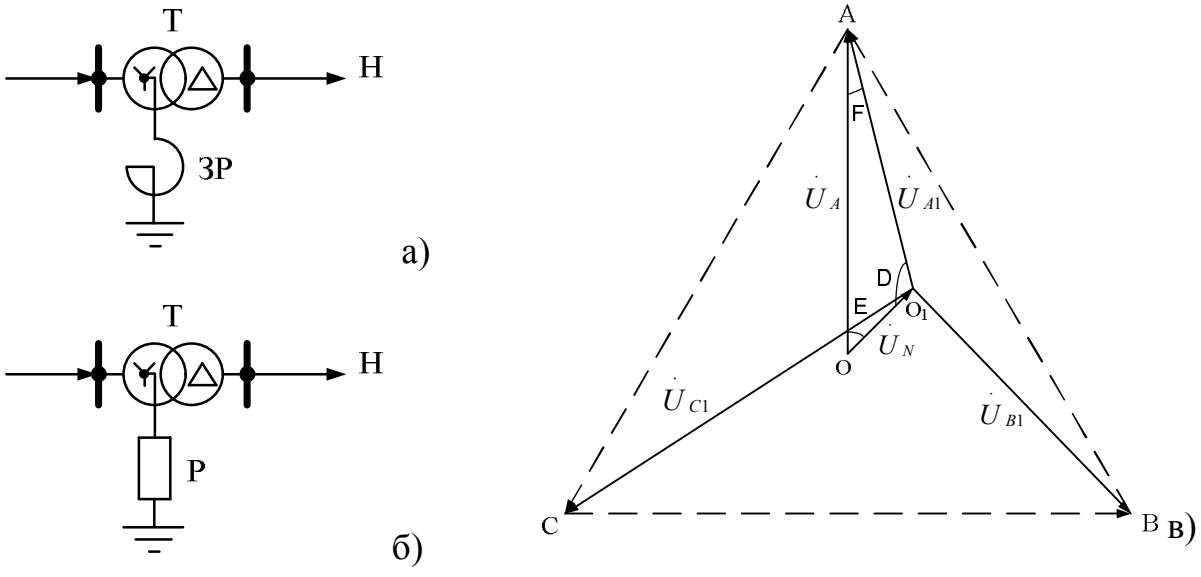


Рис. 4. Схема включения заземляющего реактора *ЗР* (а) и силового резистора *Р* (б) в нейтраль трансформатора *Т*, векторная диаграмма напряжений (в)

Процедура решения поставленной задачи очевидна:

- По известным процедурам ДЭ и соотношениям между фазными и линейными напряжениями находят вектор напряжения $\dot{U}_A$:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{AB} \Big/ \sqrt{3} \cdot e^{j30^\circ}; \tag{58}$$

- Определяют действующие значения фазных напряжений:

$$U_A = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} u_A^2(t_j) \Big|_{j=1}^{N} \right]^{0,5}; \qquad U_{A1} = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} u_{A1}^2(t_j) \Big|_{j=1}^{N} \right]^{0,5}; \tag{59}$$

- Находят угол F между векторами напряжений фазы A $\dot{U}_A$ и $\dot{U}_{A1}$, используя формулы для активной $\overset{*}{P}$ и реактивной $\overset{*}{Q}$ квазимощностей:

$$\overset{*}{P} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} \left[u_{A1}(t_j) \cdot u_A(t_j) \right]_{j=1}^{N}; \qquad F = arctg \, \overset{*}{Q} \Big/ \overset{*}{P}; \tag{60}$$

$$\overset{*}{Q} = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^{N} \left[u_{A1}(t_j) - u_{A1}(t_{j+1}) \right] \cdot \left[u_A(t_j) + u_A(t_{j+1}) \right]_{j=1}^{N}; \tag{61}$$

- Определяют косинус и синус угла F:

$$\cos F = \overset{*}{P} \Big/ \left(U_A \cdot U_{A1} \right); \qquad \sin F = \overset{*}{Q} \Big/ \left(U_A \cdot U_{A1} \right); \tag{62}$$

- Рассчитывают действующее значение напряжения смещения нейтрали по формуле:

$$U_N = \sqrt{U_A^2 + U_{A1}^2 - 2 \cdot U_A \cdot U_{A1} \cdot \cos F}\,; \qquad (63)$$

- О положении точки O_1 можно судить по углу E между напряжением U_A и напряжением U_N, углу D между напряжением U_{A1} и напряжением U_N:

$$\angle D = 180^\circ - \arcsin\left(U_A \cdot \sin F / U_N\right); \qquad \angle E = \arcsin\left(U_{A1} \cdot \sin F / U_N\right). \qquad (64)$$

Для определения параметров СЗ реактора и силового резистора по потерям мощности:

- Определяют падение напряжения $\Delta u_{12}(t_j)$ на сопротивлениях схемы замещения по формуле (53); падения напряжения: на активном сопротивлении $U_R(t_j)$; на индуктивности $U_L(t_j)$ реактора/резистора;
- Рассчитывают активную ΔP_1 и реактивную ΔQ_1 потери мощности, действующее значение тока I_1 по формулам (54)-(56);
- Находят активное R и реактивное X сопротивления РР по формуле (57).

Для определения параметров СЗ силового конденсатора по потерям мощности:

- Определяют падение напряжения на сопротивлениях схемы замещения по формуле (53);
- Рассчитывают активную ΔP_1 и реактивную ΔQ_1 потери мощности, действующее значение тока I_1 по формулам (54)-(56);
- Находят значение угла сдвига фаз между напряжением и током конденсаторной батареи по формуле (6);
- Определяют действующие значения активной I_R и реактивной I_C составляющих тока I_1:

$$I_R = I_1 \cdot \cos\varphi\,; \qquad I_C = I_1 \cdot \sin\varphi\,; \qquad (65)$$

- Находят активное R и реактивное X сопротивления силового конденсатора по формуле (57).

Исследования показали, что для способов определения параметров элементов по потерям мощности наименьшую суммарную методическую погрешность определения параметров можно получить лишь при $N \geq 64$.

С целью уменьшения числа отсчетов N (или – повышения точности расчетов при $N = const$) был разработан второй способ определения параметров вышеперечисленных элементов ЭЭС на основе решения разностных уравнений для активно-индуктивной и активно-емкостной цепей по мгновенным значениям токов, напряжений и их производных.

Для определения ПСЗ реактора и силового резистора по разностным уравнениям:

- Определяют падение напряжения на сопротивлениях схемы замещения по формуле (53);

- Рассчитывают падение напряжения на индуктивном сопротивлении схемы замещения:
$$U_L(t_j) = \Delta U_{12}(t_{j+1}) - \Delta U_{12}(t_j) \cdot i_1(t_{j+1}) \big/ i_1(t_j); \quad (66)$$
- Находят расчетную производную тока $i_P^{'}(t_j)$:
$$i_P^{'}(t_j) = i_1^{'}(t_{j+1}) - i_1^{'}(t_j) \cdot i_1(t_{j+1}) \big/ i_1(t_j); \quad (67)$$
- Рассчитывают индуктивность L_i и активное сопротивление R_i РР:
$$L_i = U_L(t_j) \big/ i_P^{'}(t_j); \qquad R_i = \left(\Delta U_{12}(t_j) - L_i \cdot i_1^{'}(t_j)\right) \big/ i_1(t_j); \quad (68)$$
- Индуктивность и активное сопротивление РР определяют для нескольких моментов времени и усредняют.

Для определения ПСЗ силового конденсатора по разностным уравнениям:

- Определяют падение напряжения на сопротивлениях схемы замещения по формуле (56);
- Рассчитывают расчетную потерю напряжения $\Delta U_{12P}(t_j)$:
$$\Delta U_{12P}(t_j) = \Delta U_{12}(t_{j+1}) - \Delta U_{12}(t_j) \cdot \Delta U_{12}^{'}(t_{j+1}) \big/ \Delta U_{12}^{'}(t_j); \quad (69)$$
- Находят активную составляющую тока $i_R(t_j)$ и активное сопротивление R_i силового конденсатора:
$$i_R(t_j) = i_1(t_{j+1}) - i_1(t_j) \cdot \Delta U_{12}^{'}(t_{j+1}) \big/ \Delta U_{12}^{'}(t_j); \quad (70) \qquad R_i = \Delta U_{12P}(t_j) \big/ i_R(t_j); \quad (71)$$
- Определяют емкость C_i силового конденсатора:
$$C_i = \left(i_1(t_j) - \Delta U_{12}(t_j) \big/ R_i\right) \big/ \Delta U_{12}^{'}(t_j); \quad (72)$$
- Емкость и активное сопротивление силового конденсатора определяют для нескольких моментов времени и усредняют их.

Для способов определения параметров элементов по разностным уравнениям наименьшую суммарную методическую погрешность определения параметров можно получить уже при $N \geq 32$.

Наименьшую суммарную погрешность δ_Σ определения параметров силовых конденсаторов и резисторов, реакторов можно получить, используя трансформаторы тока и напряжения класса точности «0,5», регистратор электрических сигналов SMART-WAMS и: 1) при $N \geq 64$ – для способа определения по потерям мощности; 2) при $N \geq 32$ – для способа определения по разностным уравнениям. При прочих равных условиях параметры рассматриваемых элементов ЭЭС целесообразно определять по разностным уравнениям.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложены способы определения параметров схем замещения силовых конденсаторов и резисторов, реакторов в рабочем режиме по массивам мгновенных значений токов и напряжений, как по потерям мощности, так и по разностным уравнениям.

2. Разработан способ определения напряжения нейтрали и положения нулевой точки по массивам мгновенных значений фазных напряжений.
3. Предложены способы определения первичных и вторичных параметров линий электропередачи по потерям мощности в одном или двух рабочих режимах по массивам мгновенных значений токов и напряжений.
4. Разработанные способы идентификации параметров линий электропередачи, силовых конденсаторов и резисторов, реакторов в рабочем режиме позволяют проводить мониторинг их параметров и диагностировать техническое состояние.
5. Результаты работы могут быть использованы при разработке эффективных методов и технических средств систем управления ЭЭС.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ПРЕДСТАВЛЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Джумик Д.В., Левин Д.В. Контроль и диагностика электротехнических устройств и моделей на основе теоремы Телледжена // Матер. X научно-техн. конф. «Энергетика: экология, надежность, безопасность», 8–10 декабря 2004 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – С. 86–88.
2. Джумик Д.В. Определение текущих параметров электрического режима линии электропередачи для построения ее адаптивной модели // Современные техника и технологии: Труды XI Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 29 марта – 2 апреля 2005 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – Т. 1. – С. 82–84.
3. Джумик Д.В., Гольдштейн Е.И., Хрущев Ю.В. Использование массивов мгновенных значений токов и напряжений в задачах формирования адаптивных моделей электроэнергетических систем // Вестник УГТУ-УПИ. Проблемы управления электроэнергетикой в условиях конкурентного рынка: Сб. трудов / Отв. ред. П.И. Бартоломей. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ», 2005. – № 12 (64). – С. 316–321.
4. Джумик Д.В. Использование аппарата дискретизированной электротехники при определении текущих параметров схем замещения линии электропередачи // Физико-математическое моделирование систем: Матер. II Междунар. семинара. Ч. 2: Моделирование технических систем. Математическое и программное обеспечение систем компьютерного моделирования. – Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2005. – С. 17–22.
5. Dzhumik D.V. The determination current parameters electric mode to transmission line for building its T-form adaptive model // Modern Techniques and Technologies (MTT’2006): Proc. of the XII Intern. Scientific and Practical Conf. of Students, Post-graduates and Young Scientists. – Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2006. – P. 12–15.
6. Джумик Д.В., Гольдштейн Е.И., Хрущев Ю.В., Бацева Н.Л., Кац И.М., Панкратов А.В., Радаев Е.В., Сулайманов А.О. Функциональный

контроль и диагностирование электроэнергетических систем и их элементов // Системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии: Матер. Междунар. научно-техн. семинара. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – С. 98–108.
7. Джумик Д.В., Кац И.М., Панкратов А.В. Программно-аппаратный комплекс (прибор, алгоритмы и программное обеспечение) для функционального обследования ЭЭС // Всеросс. конференция-конкурс инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению Программы «Энергетика и энергосбережение», 26–29 сентября 2006 г. Труды конференции. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2006. – С. 34–40.
8. Гольдштейн Е.И., Бацева Н.Л., Джумик Д.В., Усов Ю.П. Диагностирование электрических цепей. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 152 с.
9. Джумик Д.В. Определение параметров схем замещения линий электропередачи, резисторов, реакторов и конденсаторных батарей по массивам мгновенных значений токов и напряжений // Современные техника и технологии: Труды XIII Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 26–30 марта 2007 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – Т.1. – С. 35–37.
10. Гольдштейн Е.И., Джумик Д.В. Использование аппарата дискретизированной электротехники при диагностировании линий электропередач, реакторов, силовых резисторов и конденсаторных батарей // «Известия ТПУ». – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – №4. – С. 82–84.
11. Джумик Д.В. Определение параметров схем замещения линий электропередач, реакторов, силовых резисторов и конденсаторных батарей по массивам мгновенных значений токов и напряжений // «Известия ТПУ». – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – №4. – С. 85–87.
12. Пат. 2282201 РФ МПК7 G01R 25/00. Способ определения текущих параметров электрического режима линии электропередачи для построения ее адаптивной модели / Е.И. Гольдштейн, Д.В. Джумик, Ю.В. Хрущев. – Заявлено 11.05.2005; Опубл. 20.08.2006. Бюлл. № 23.
13. Пат. 49278 РФ МПК7 G01R 25/00. Устройство для определения текущих параметров электрического режима линии электропередачи / Е.И. Гольдштейн, Д.В. Джумик, Ю.В. Хрущев. – Заявлено 11.05.2005; Опубл. 10.11.2005. Бюлл. № 31.
14. Пат. 51752 РФ МПК7 G01R 25/00. Устройство для определения текущих параметров электрического режима линии электропередачи / Е.И. Гольдштейн, Д.В. Джумик. – Заявлено 12.09.2005; Опубл. 27.02.2006. Бюлл. № 6.
15. Пат. 57016 РФ МПК7 G01R 25/00. Устройство для определения текущих параметров электрического режима линии электропередачи / Е.И. Гольдштейн, Д.В. Джумик. – Заявлено 20.03.2006; Опубл. 27.09.2006. Бюлл. № 27.

16. Пат. 2289823 РФ МПК7 G01R 27/04, G01R 27/08. Способ определения текущих параметров электрического режима линии электропередачи для построения ее Г-образной адаптивной модели / Е.И. Гольдштейн, Д.В. Джумик. – Заявлено 12.09.2005; Опубл. 20.12.2006. Бюлл. № 35.
17. Пат. 59837 РФ МПК7 G01R 25/00. Устройство для определения напряжения нейтрали и положения нулевой точки / Е.И. Гольдштейн, Д.В. Джумик. – Заявлено 02.05.2006; Опубл. 27.12.2006. Бюлл. № 36.
18. Пат. 64387 РФ МПК7 G01R 25/00. Устройство для определения параметров линейного токоограничивающего реактора/резистора / Е.И. Гольдштейн, Д.В. Джумик. – Заявлено 28.12.2006; Опубл. 27.06.2007. Бюлл. № 18.
19. Пат. 64388 РФ МПК7 G01R 25/00. Устройство для определения параметров линейного токоограничивающего реактора/резистора / Е.И. Гольдштейн, Д.В. Джумик. – Заявлено 28.12.2006; Опубл. 27.06.2007. Бюлл. № 18.
20. Пат. 2308729 РФ МПК7 G01R 27/04, G01R 7/63. Способ определения текущих параметров электрического режима линии электропередачи для построения ее Т-образной адаптивной модели / Е.И. Гольдштейн, Д.В. Джумик. – Заявлено 20.03.2006; Опубл. 20.10.2007. Бюлл. № 29.
21. Пат. 65656 РФ МПК7 G01R 25/00. Устройство для определения параметров линейной конденсаторной батареи / Е.И. Гольдштейн, Д.В. Джумик. – Заявлено 19.01.2007; Опубл. 10.08.2007. Бюлл. № 22.
22. Пат. 67274 РФ МПК7 G01R 25/00. Устройство для определения параметров линейного токоограничивающего реактора/резистора / Е.И. Гольдштейн, Д.В. Джумик. – Заявлено 05.02.2007; Опубл. 10.10.2007. Бюлл. № 28.
23. Пат. 67275 РФ МПК7 G01R 25/00. Устройство для определения параметров линейной конденсаторной батареи / Е.И. Гольдштейн, Д.В. Джумик. – Заявлено 05.02.2007; Опубл. 10.10.2007. Бюлл. № 28.
24. Пат. 67276 РФ МПК7 G01R 25/00. Устройство для определения параметров линейной конденсаторной батареи / Е.И. Гольдштейн, Д.В. Джумик. – Заявлено 26.03.2007; Опубл. 10.10.2007. Бюлл. № 28.
25. Пат. 67277 РФ МПК7 G01R 25/00. Устройство для определения текущих параметров линии электропередачи / Е.И. Гольдштейн, Д.В. Джумик. – Заявлено 19.01.2007; Опубл. 10.10.2007. Бюлл. № 28.
26. Пат. 69261 РФ МПК7 G01R 25/00. Устройство для определения текущих первичных и вторичных параметров линии электропередачи / Е.И. Гольдштейн, Д.В. Джумик., Д.В. Левин. – Заявлено 04.06.2007; Опубл. 10.12.2007. Бюлл. № 34.
27. Пат. 69262 РФ МПК7 G01R 25/00. Устройство для определения текущих первичных и вторичных параметров линии электропередачи / Е.И. Гольдштейн, Д.В. Джумик. – Заявлено 04.06.2007; Опубл. 10.12.2007. Бюлл. № 34.